



Structure from Motion -fotogrammetria
luonnonmaantieteellisessä tutkimuksessa

Hermann Hentunen

7903501A

Luonnontieteen kandidaatin tutkielma

Oulun yliopisto

Maantieteen tutkimusyksikkö

13.05.2020

Yksikkö: Maantieteen tutkimusyksikkö		Pääaine: Maantiede	
Tekijä (Sukunimi ja etunimet, myös entinen sukunimi): Hentunen, Antti Hermann		Opiskelija-numero: 2477084	Tutkielman sivumäärä: 25
Tutkielman nimi (suomeksi; muun kielinen nimi ilmoitetaan vain, jos se on tutkielman kieli): Structure from Motion -fotogrammetria luonnonmaantieteellisessä tutkimuksessa			
Asiasanat:	Structure from Motion, SfM, fotogrammetria, kaukokartoitus, laserkeilaus, geomorfologia, drone, kaukokartoitus		
<p>Structure from Motion -fotogrammetrian ja dronen yhdistäminen voi tarjota käyttökelpoisia ja edullisia ratkaisuja korkeusmallien luomiseen. Tämän tutkielman tarkoituksena on kirjallisuuden perusteella perehtyä metodin käyttöön luonnonmaantieteellisessä tutkimuksessa, ja tarjota vastaus kahteen tutkimuskysymykseen: kuinka tarkkoja metodilla tuotetut korkeusmallit ovat verrattuna yleisesti käytettyihin korkeusmalleihin, sekä kuinka metodologia on aiemmin hyödynnetty luonnonmaantieteellisessä tutkimuksessa, ja kuinka sitä tulevaisuudessa voidaan edelleen hyödyntää.</p> <p>Structure from Motion on fotogrammetrinen metodi, joka perustuu kohteiden tunnistamiseen toisiaan leikkaavista, eri suunnista kuvatuista kuvista, mahdollistaen näin korkeusmallien luomisen. Metodin tarkkuuteen vaikuttaa suuri määrä erinäisiä tekijöitä, muun muassa käytettävä kamera, kuvauskorkeus, kuvattavan pinnan tekstuuri, sekä käytettävä ohjelmisto.</p> <p>Kirjallisuuskatsauksen perusteella metodilla tuotettavat korkeusmallit voivat olla riittävän tarkkoja tutkimuskäyttöön, kunhan edellä mainitut epävarmuustekijät tunnistetaan ja huomioidaan prosessin aikana. Metodilla on tutkittu etenkin geomorfologista muutosta, kuten eroosiota. Suurella osalla aikaisemmasta tutkimuksesta on ollut motiivina validoida metodologia eri tutkimuskohteissa varsinaisen uuden tiedon tuottamisen sijaan. Tulevaisuudessa metodi ottanee paikkansa kaukokartoituskentältä pieneköiden tutkimusalueiden suuriresoluutioisena ja responsiivisenä metodina.</p>			
Muita tietoja:			
Päiväys:	13.5.2020		

Sisällys

Sisällys	3
Lyhenteet	4
Johdanto	5
Structure from Motion	7
Sensorit	9
Alustat	10
Perinteiset metodit korkeusmallien luomiseen	13
Metodin luotettavuus ja tarkkuus	14
Johtopäätökset ja pohdinta	19
Lähteet	22

Lyhenteet

ALS	Aerial Laser Scanning, ilmasta tapahtuva laserkeilaus.
BA	Bundle Adjustment, osa Structure from Motion -algoritmiä, joka mm. arvioi kameran sisäisiä parametrejä.
DEM	Digital Elevation Model, digitaalinen korkeusmalli.
DoD	DEM of Difference. Kahden korkeusmallin arvojen erotus, jota voidaan käyttää mallin tarkkuuden arvioinnissa.
DSM	Digital Surface Model, digitaalinen pintamalli.
DTM	Digital Terrain Model, digitaalinen maastomalli.
GCP	Ground Control Point, maassa sijaitseva piste, jonka koordinaatit tunnetaan. Voidaan hyödyntää sekä korkeusmallin georeferoinnissa että tarkkuuden arvioinnissa.
GPS	Global Positioning System, yleisesti käytetty satelliittipaikannusjärjestelmä.
LIDAR	Light Detection and Ranging, laserkeilaus.
MVS	Multiview Stereo, algoritmi, osa SfM -työnkulkua.
RMSE	Root Mean Square Error, keskineliövirhe, korkeusmallien tarkkuuden arvioinnissa hyödynnetty muuttuja.
SfM	Structure From Motion, fotogrammetrinen metodi, jolla voidaan luoda kolmiulotteisia malleja tavallisista valokuvista.
SIFT	Scale Invariant Feature Transform, vastaavuksien etsinnässä käytetty algoritmi.
TLS	Terrestrial Laser Scanning, maasta tapahtuva laserkeilaus.

Johdanto

Erilaiset kolmiulotteiset korkeusmallit maapallon pinnasta tarjoavat korvaamatonta tietoa luonnonmaantieteilijälle esimerkiksi alueen geomorfologiasta, kasvillisuudesta ja muista ilmiöstä. Yleisesti käytössä olevat pintamallit on tavallisesti luotu esimerkiksi satelliitti-, ilmakuvien, tai laserkeilauksen avulla. Näiden perinteisten kaukokartoitusmetodien tuottama tieto, vaikkakin laadukasta ja tarkkaa, voi usein olla sekä ajalliselta että tilalliselta resoluutioltaan riittämätöntä (DeBell ym. 2016: 8). Tämä tarkoittaa sitä, että uusia versioita aineistoista tuotetaan liian harvoin ajallisen muutoksen seurantaan, tai sen mittakaava on liian pieni joidenkin tarkkapiirteisten kohteiden havaitsemiseen.

Kaukokartoitusalan kehitys on johtanut siihen, että monimutkainen ja erikoistunut insinööritiede alkaa tulla hiljalleen lähemmäksi tavallista tutkijaa. Esimerkiksi kevyet kannettavat GPS-takymetrit ja laserkeilaimet mahdollistavat tutkimuksen halutulla alueella, mutta ovat ratkaisuna kalliita. Kehitys kahdella alalla, miehittämättömissä ilma-aluksissa, tutummin droneissa, sekä Structure from Motion -fotogrammetriassa, saattaa jo nyt mahdollistaa edullisen ja tehokkaan pintamallin tuotannon lähes kenelle tahansa.

Dronet ovat oivallinen alusta eri kaukokartoitussensoreille, kuten pienikokoisille laserkeilaimille tai infrapunakameroille. Ne mahdollistavat tiedonkeruun tavallisia menetelmiä suuremmalla resoluutiolla, tarvittaessa nopeallakin vasteajalla myös luonnonkatastrofin, kuten esimerkiksi tulvan (Langhammer & Vacková 2018) tai massaliikunnan jälkeen (Lucieer ym. 2014).

Structure from Motion -metodi on fotogrammetrinen työkalu, joka mahdollistaa kolmiulotteisten mallien luonnin järjestämättömistä, suuntaamattomista, samaa kohdetta esittävistä, toisiaan leikkaavista kuvista, jotka voivat olla otettu esimerkiksi matkapuhelimella, videokameralla, tai muulla kuluttajatasoisella kameralla (esim. Schönberger & Frahm 2016, Smith ym. 2016). Kuvien käsittelyyn ja mallintamiseen on saatavilla useita ohjelmistoja, joista monet ovat ilmaisia ja avoimeen lähdekoodiin perustuvia (Yanagi & Chikatsu 2016).

Dronen ja Structure from Motion -fotogrammetrian yhdistelmällä tehty tutkimus on saanut viime vuosina jalansijaa luonnonmaantieteessä ja lähialoilla, ja metodilla on tutkittu esimerkiksi geomorfologista muutosta (Cook 2017), metsien hiilivarastoja (McClelland ym. 2020), ja jäätikköjä (Westoby ym. 2012). On tärkeää muistaa, että

dronen ja Structure from Motionin hyödyntäminen tutkimuksessa on mahdollista myös erillään; esimerkiksi Micheletti kumppaneineen (2015) on tutkinut käsivaraisten matkapuhelimen käyttöä sensorina.

Tämän kandidaatin tutkielman tarkoituksena on perehtyä syvemmin Structure from Motion -fotogrammetriaan, ja vastata seuraaviin kysymyksiin:

1. Kuinka tarkkoja metodilla luodut pintamallit ovat, ja kuinka luotettavia ne ovat verrattuna perinteisillä kaukokartoitusmetodeilla luotuihin malleihin?
2. Kuinka metodia on hyödynnetty luonnonmaantieteellisessä tutkimuksessa, ja kuinka sitä voidaan jatkossa edelleen hyödyntää?

Tämä tutkielma on kirjallisuuskatsaus, jossa alan kirjallisuuden ja tieteellisten artikkelien pohjalta pohdin etsin vastauksia yllä oleviin kysymyksiin. Ensimmäiseksi esittelen Structure from Motion -fotogrammetrian perusperiaatteet ja toiminnan, sekä metodin hyödyntämiseen soveltuvat ohjelmistot, sensorit ja alustat. Toisena perehdyn perinteisiin korkeusmallien luontimenetelmiin, kuten laserskannaukseen. Kolmantena esittelen kirjallisuuden perusteella, mitkä tekijät kaukokartoituksessa, ja erityisesti Structure from Motion -fotogrammetriassa aiheuttavat epävarmuutta ja virhettä, ja kuinka metodin tarkkuutta ja luotettavuutta voidaan arvioida. Samalla tulee esiteltä luonnonmaantieteellisiä tutkimusaloja, joilla metodia on jo hyödynnetty. Työn viimeisessä osassa vastaan pohdin tutkimuskysymyksiä sekä metodin tulevaisuutta.

Structure from Motion

Korkeusmalli on maanpinnan muodon numeerinen esitys, joka sisältää sekä varsinaiset mitatut korkeuspisteet, että keinon interpoloida arvoja varsinaisten korkeuspisteiden väliin. Korkeusmalliin viitataan usein termillä DEM, joka tulee englannin kielen sanoista Digital Elevation Model. Muita läheisiä termejä ovat maastomalli (DTM, Digital Terrain Model), joka sisältää korkeustiedon lisäksi muitakin ominaisuuksia esimerkiksi rinteen kaltevuudesta tai maanpeitteestä, sekä pintamalli (DSM, Digital Surface Model), joka sisältää maanpinnan korkeustiedon sijaan tiedon absoluuttisesti korkeimmista pisteistä, kuten rakennusten katoista tai puiden latvoista (Kansallisen... 2016). Tässä työssä puhuttaessa luotavista ja käsiteltävistä malleista tarkoitetaan aina korkeusmallia (DEM), ellei muuta erikseen mainita.

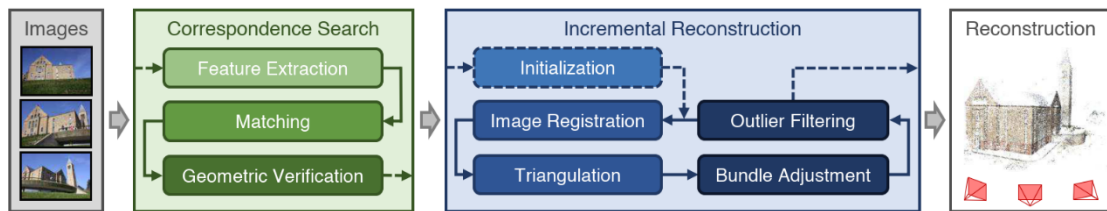
Structure from Motion (SfM) on fotogrammetrinen metodi, algoritmi, jonka tarkoituksena on selvittää kohteen geometria ja kolmiulotteinen sijainti useiden, päällekkäisyyksiä sisältävien, lomittaisten kuvien perusteella ja näin luoda kolmiulotteinen malli, kuten digitaalinen korkeusmalli (Smith ym. 2016). Perinteinen digitaalinen fotogrammetria määrittää kohteen kolmiulotteisen sijainnin joko kameran tunnetun sijainnin ja asennon perusteella kolmiomittamalla, tai manuaalisesti tunnistettujen, mitattujen tarkastuspisteiden avulla. SfM suorittaa vastaavien piirteiden tunnistamisen automaattisesti, ja määrittää niille suhteellisen sijainnin (Westoby ym. 2012).

Metodin toiminta koostuu Schönbergerin ja Frahm'n mukaan kahdesta päävaiheesta, joissa lähtökohtana olevista kuvista luodaan valmis malli. Nämä vaiheet ovat vastaavuuksien etsintä ja inkrementaalinen rekonstruktio, ja ne voidaan edelleen jakaa useisiin välivaiheisiin (Schönberger & Frahm 2016).

Vastaavuuksien etsintä alkaa tunnistamalla erinäisiä piirteitä kuvista. Tätä varten on kehitetty lukuisia algoritmeja joista käytetyin (Schönberger & Frahm 2016, Smith ym. 2016) lienee Scale Invariant Feature Transform (SIFT). Algoritmi etsii eri piirteitä kuvista, ja vertailee niitä toisiinsa eri mittakaavoissa ja asennoissa, tunnistuen näin yhtenevät piirteet eri kuvista. Seuraavassa vaiheessa eri kuvia ja niiden sisältämiä piirteitä verrataan toisiinsa, tavoitteena tunnistaa kuvat, jotka sisältävät yhteneviä osia maisemasta

(Qiaoliang ym. 2009). Vastaavuuksien etsinnän viimeisessä vaiheessa geometrisesti johdonmukaiset yhteensopivuudet säilytetään, ja loput hylätään sopimattomina.

Inkrementaalisen rekonstruktion vaiheessa vuorossa on kohteen kolmiulotteisen geometrian selvittäminen kuvista valittujen piirteiden avulla. Bundle Adjustment -algoritmi (BA) ratkaisee yhtäaikaisesti käytettyjen kameroiden parametrit, kuten suunnan ja asennon sekä kohteen pinnanmuodot (Smith ym. 2016). BA voidaan suorittaa useita kertoja, jolloin tulokset ovat tarkempia, ja virheelliset parametrit poistetaan (Schönberger & Frahm 2016). Kuvassa 1 on esitetty mallin vaiheittainen toiminta.



Kuva 1. Structure from Motion -algoritmin vaiheittainen toiminta. Kuva (Schönberger & Frahm 2016: 4105).

Tässä vaiheessa syntynyt malli on mielivaltaisessa koordinaatistossa (Westoby ym. 2012). Tällainen malli voi olla riittävä jossain tapauksissa, esimerkiksi tutkittaessa vulkaanista pommia (James & Robson 2012) tai siirtolohkareita (Mikita ym. 2020). Useimmiten mallin hyödyntäminen luonnonmaantieteellisessä tutkimuksessa vaatii kuitenkin sen georeferoinnin haluttuun koordinaattijärjestelmään. Tämä on mahdollista joko BA-algoritmin suorituksen aikana (Eltner ym. 2016) tai mallin valmistumisen jälkeen, jolloin on mahdollista havainnoida mallista selkeästi näkyviä pisteitä, ja selvittää niiden sijainti erillään varsinaisesta aineiston hankinnasta (Westoby ym. 2012). Suositeltavaa kuitenkin on, että sijainnin määrittämiseen käytetään etukäteen määriteltäviä, maastosta selkeästi erottuvia pisteitä ja merkkejä, joita on mahdollisuuksien mukaan useampia, ja jotka sijaitsevat eri puolilla tutkimusaluetta (Oniga ym. 2020). Esimerkiksi Cook (2017) hyödynsi kallioihin maalattuja rakseja, ja Westoby (2012) kumppaneineen keltaisia lakanoita.

Georeferoitu malli on nyt periaatteessa valmis, mutta siitä on mahdollista saada vielä moninkertaisesti tarkempi hyödyntämällä Multi-View Stereo -algoritmeja. MVS-algoritmeilla on mahdollista interpoloida varsinaisen SfM -pistepilven pisteiden väliin

suuri joukko uusia pisteitä, niin että pisteiden määrä jopa satakertaistuu (Smith ym. 2016: 255).

On tärkeää huomata, että kirjallisuudessa käytetään vaihtelevasti edellä kuvatus kaltaisesta prosessista termejä SfM-MVS (esim James & Robson 2012, Smith ym. 2016). MVS kuvastaa prosessin loppuosaa, jossa varsinaisen SfM -algoritmin luomasta harvasta pistepilvestä luodaan tiheämpi versio. Vakiintuneempi käytäntö on kuitenkin viitata koko prosessiin pelkästään termillä SfM, jota käytetään myös tässä tutkielmassa.

Structure from Motion -ohjelmistojen kirjo on laaja. Saatavilla on sekä kaupallisia että avoimeen lähdekoodiin perustuvia ilmaisia ohjelmistoja. Ranskan kansallisen maantieteellisen instituutin kehittämä MicMac on esimerkki avoimen lähdekoodin ohjelmistosta, ja sitä on hyödyntänyt esimerkiksi Rupnik kumppaneineen (2018) satelliittikuva-aineiston kanssa. Kaupalliselta puolelta löytyy esimerkiksi Agisoft Metashape, venäläinen ohjelmisto joka aikaisemmalta nimeltään oli Photosynth. Se lienee käytetyimpiä SfM -ohjelmistoja (Peña-Villasenín ym. 2020: 2).

Molemmat tyyppisillä ohjelmistoilla on omat etunsa ja kääntöpuolensa. Esimerkiksi Metashapeen on saatavilla laajat käyttöohjeet (Agisoft 2020), jolloin sen käyttöönotto voi olla fotogrammetriaa tuntevalle helpompaa. Toisaalta ohjelmisto ei tarkalleen paljasta, kuinka se suorittaa erilaiset algoritmit ja laskutoimitukset, vaan pyytää käyttäjältä syötteen ja prosessoi siitä valmiin tulosteen ilman käyttäjän vaikutusta. Kyseessä on siis niin sanottu mustan laatikon ohjelmisto. Avoimen lähdekoodin ohjelmisto on usein vapaaehtoisten kehittämä, ja siinä käyttäjä pystyy vaikuttamaan tapahtumiin tarvittaessa jopa lähdekoodia muokkaamalla. Kääntöpuolena on taasen mahdollisesti heikompi tuki ja käyttäjän virheet.

Sensorit

Perinteinen fotogrammetria vaatii, että käytössä on niin kutsuttu metrinen kamera (metric camera), jonka tarkkuus, polttoväli ja muut ominaisuustiedot ovat tarkasti tunnettuja, jolloin niiden aiheuttama häiriö kuvissa on mahdollisimman pieni ja korjattavissa matemaattisesti (Lillesand & Kiefer 2000). SfM-metodin käyttö puolestaan mahdollistaa minkä tahansa kameran käytön kuvantamiseen, aina videokameroista pölkäreiden kautta järjestelmäkameroihin (Eltner ym. 2016). Smithin ja kumppaneiden (Smith ym. 2016)

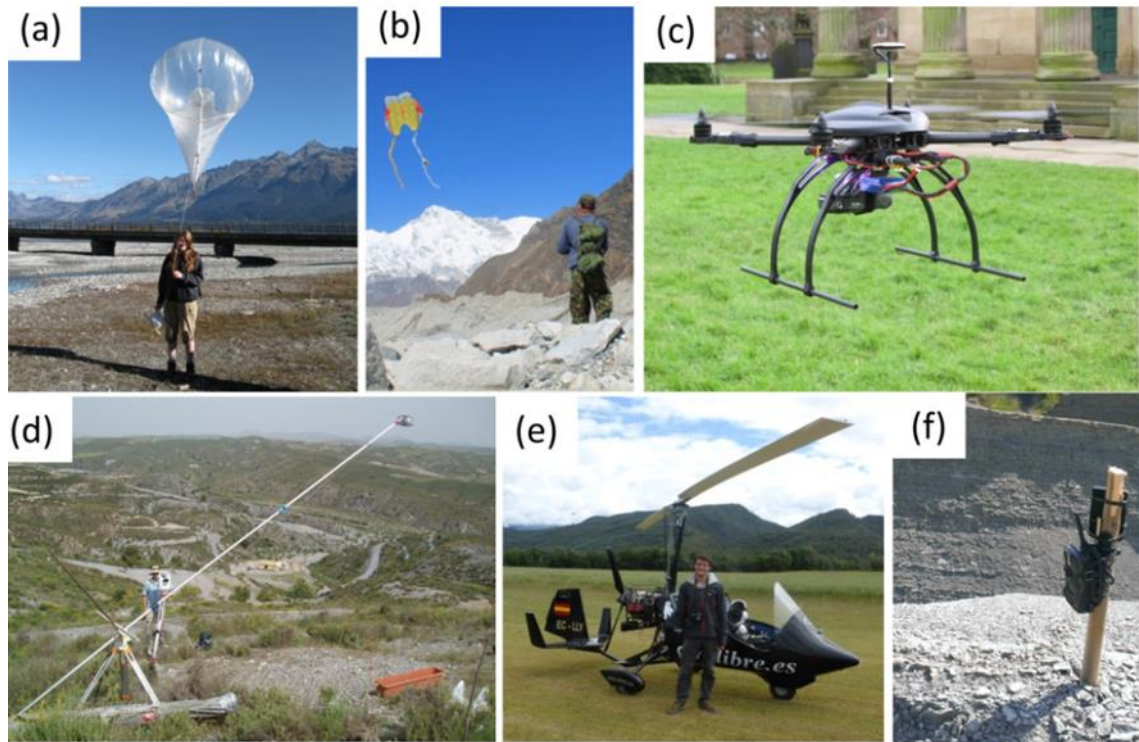
mukaan videokamerat tuottavat heikkolaatuisinta materiaalia, kun taas matkapuhelin- ja järjestelmäkameralla hankitun aineiston tuottama tarkkuus ei juuri eroa, ainakaan pienen tutkimusalueen läheltä tehdyssä kuvantamisissa (Micheletti ym. 2015). Linssin tyyppi on itse kameraa tärkeämpää, esimerkiksi kalansilmälinssistä tulisi välttää niiden vaatiman monimutkaisen kalibroinnin vuoksi (James & Robson 2012:2). Jos käytetään kuvantamislustaa, kuten dronea, tulee huomioda myös sen hyötykuorman aiheuttamat rajoitukset kameran koolle, sekä mahdollisuus etä- tai automaattilaukaisuun.

Käytettyjen kuvien ei tarvitse olla otettu samalla kameralla, sillä algoritmi osaa ottaa tämän mahdollisuuden huomioon (Schönberger & Frahm 2016). Snavely kumppaneineen (2008) hyödynsi tätä mallintaessaan nähtävyyksiä ihmisten internetiin lataamien kuvien perusteella, luoden samalla pohjan nykyisinkaltaiselle SfM -työjärjestykselle (Westoby ym. 2012).

Alustat

Smithin ja kumppaneiden (2016) mukaan soveltuvan kuvausalustan valinta on riippuvaista tutkimuskohteesta. Valintaan vaikuttavat pääasiassa neljä tekijää: toivottu resoluutio, kattavuus, kuvanlaatu ja kustannustehokkuus. Lisäksi vaakakupissa voi painaa esimerkiksi tutkimusalueen tai -kohteen saavutettavuus. Käytännössä luonnonmaantieteellisessä tutkimuksessa alustavaihtoehdot ovat maanpäälliset alustat, kuten käsivarakamera, ajoneuvot sekä esimerkiksi veneet, sekä erilaiset ilma-alustat, kuten helikopterit, lentokoneet ja miehittämättömät ilma-alukset (Eltner ym. 2016: 361).

Kuvassa 2 on esitelty mahdollisia alustoja SfM -datan hankintaan.



Kuva 2. Mahdollisia alustoja SfM -datan hankintaan. a. Ilmaa kevyempi pallo b. leija c. drone d. kameramasto e. gyrokooperi f. riistakamera (Smith et al. 2016: 256).

Miehittämättömissä ilma-aluksissa 1990-luvulta alkaen tapahtunut teknologinen kehitys on johtanut niiden laajaan hyödyntämiseen tutkimuskäytössä. Ilma-aluksien joukko on moninainen, ja niitä voidaan luokitella usein eri tavoin, esimerkiksi lentomatkan, -korkeuden, lentoonlähöpainon tai siipien tyypin mukaan (Colomina & Molina 2014). Tässä työssä esiintyvät miehittämättömät ilma-alukset ovat 4-8 roottorin multikoptereita, joista käytän selkeyden vuoksi termiä drone. Yleensä dronen lentoonlähöpaino vaihtelee joistain sadoista grammoista muutamiin kiloihin, ja lentoajat jäävät alle tunnin (DeBell ym. 2016: 10-12).

Dronet ovat ilma-aluksia, ja niiden käytössä on muistettava ottaa huomioon lainsäädännölliset ja alueelliset rajoitukset, sekä huolehdittava esimerkiksi yksityisyydensuojasta. Tällä hetkellä Suomessa voimassa oleva lainsäädäntö erittelee dronejen käyttäjät harrastajiin ja lentotyötekeviin. Lentotyötä tekevien on tehtävä toiminnastaan ilmoitus, harrastajia taas koskee yleiset rajoitukset, kuten etäisyysrajoitukset lentokentistä, erikseen määritetyistä lentokieltoalueista, väkijoukoista

ja asutuksesta (Droneinfo 2020). Koko Euroopan unionin alueella ollaan siirtymässä kuitenkin yhteiseurooppalaiseen miehittämättömien ilma-alusten lainsäädäntöön, joka esimerkiksi jaottelee dronet painon ja lennätyspaikan mukaan kolmeen lentolupaluokkaan, ja poistaa erittelyn harrastus- ja työkäytön väliltä (EU 2019/947).

SfM-datan hankinnassa on suositeltavaa lennättää dronea automaattisesti esiohjelmoituja lentoreittejä pitkin. Näin saadaan vakioitua lentokorkeus ja suunniteltua lentoreitit niin, että kuvissa on riittävästi päällekkäisyyttä mahdollisimman tarkan mallin luomiseksi. Esiohjelmoitua lentoreitistä huolimatta, dronea tulee lennättää aina näköetäisyydellä ohjaajasta, ja se on voitava ottaa ongelmien ilmetessä käsiohjaukseen vaaratilanteiden välttämiseksi.

Perinteiset metodit korkeusmallien luomiseen

Structure from motion -fotogrammetria on uusimpia työkaluja maan pinnan muotojen selvittämiseen. Muita keinoja ovat esimerkiksi laserskannaus sekä ilmakuvauus ja perinteinen fotogrammetria. Molempia voidaan harjoittaa sekä lentokoneesta että satelliitista, sekä SfM:n tavoin miehittämättömästä ilma-aluksesta. Laserskannaus on mahdollista myös maasta käsin. Kaukokartoitusmenetit voidaan jakaa kahtia passiivisiin ja aktiivisiin metodeihin. Passiiviset menetit perustuvat auringonvaloon ja sen hajoamiseen ja heijastumiseen, kun taas aktiiviset hyödyntävät ulkoista valonlähdettä (Koslovskiy & Koslovskiy 2010).

Yksi yleisesti käytetty keino pintamallin luomiseen on laserskannaus. Ilmasta käsin tapahtuva laserskannaus, johon yleensä viitataan nimellä LIDAR, Light detection and ranging, tai ALS, Aerial laser scanning. Tämä aktiivinen kaukokartoitusmetodi alkoi yleistyä 1990-luvun puolen välin jälkeen (Baltasvias 1999). LIDAR-järjestelmä lähettää laserpulsseja, jotka heijastuvat takaisin osuessaan johonkin pintaan, oli se vettä, rakennus, kasvillisuutta tai maanpintaa. Heijastuksen paluuaikaan perustuen järjestelmä kykenee laskemaan etäisyyden pintaan, eli pinnan korkeuden. Näin syntyy kolmiulotteinen, järjestelmään kuuluvien satelliittipaikantimien ja inertiamittareiden avulla suoraan georeferoitu pistepilvi (Lillesand & Kiefer 2000). Toinen vaihtoehto on lähettää jatkuvaa valoa, jonka voimakkuus vaihtelee tunnetussa syklistä, jolloin paluuheijastukset voidaan tunnistaa oikein (Wehr & Lohr 1999).

Nykyiset laserskannerit kykenevät vastaanottamaan jokaista pulssia kohden useamman kuin yhden paluusignaalin. Esimerkiksi ensimmäinen paluusignaali voi tulla puun latvasta ja toinen maasta latvuston alla, tai ensimmäinen rakennuksen räystäään reunasta ja toinen maasta räystäään alta (Mallet & Bretar 2009). Koska yksittäinen laserkeilausaineisto sisältää tiedon sekä maan pinnanmuodoista, että pinnan yläpuolisista asioista, on se saavuttanut suosiota esimerkiksi metsäntutkimuksen saralla, koska sekä latvuston että maanpinnan tutkiminen on mahdollista samasta aineistosta (esim. Korpela ym. 2013).

Metodin luotettavuus ja tarkkuus

Maantieteellinen tieto on Zhangin ja Goodchildin (2002) mukaan aina enemmän tai vähemmän epätarkkaa johtuen maantieteellisen maailman monimutkaisuudesta. Tätä monimutkaista tietoa on mahdoton kuvata absoluuttisen tarkasti, ja tietoa joudutaan abstraktoimaan ja yksinkertaistamaan, jotta sen käsittely olisi edes mahdollista.

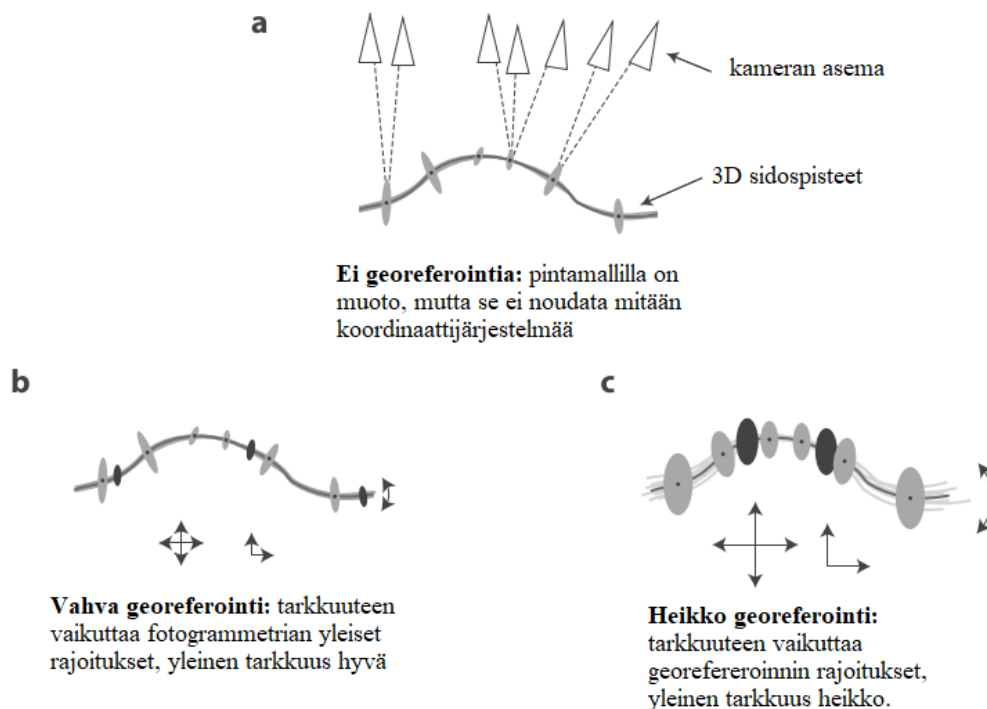
Koska Structure from Motion on metodina uudehko maantieteellisessä tutkimuksessa, sillä ei ole samalla tavalla syntynyttä validiteettia, kuten pitkät perinteet omaavalla perinteisellä fotogrammetrialla, tai laajasti käytetyllä laserkeilauksella (James & Robson 2012). Viimeisen vuosikymmenen aikana on tutkittu runsaasti metodin tarkkuutta, jotta sen validiteetti ja reliabiliteetti saataisiin todistettua. Tämä arviointia on suoritettu vertaamalla tuloksia vakituksessa tutkimuskäytössä olevilla metodeilla saavutettuihin tuloksiin. Tarkkuus tarkoittaa tietoaaineiston ominaisuutta, joka kuvaa mitatun arvon ja todellisen arvon läheisyyttä (Geoinfomatiikan sanasto 2018). Koska maantieteellisen tiedon todellista arvoa ei voida ikinä tietää, tarkoitetaan tässä työssä tarkkuudella tiedon läheisyyttä validoidulla metodilla mitattuun tietoon.

James ja Robson (2012: 4) erittelevät kolme mahdollista SfM-metodin sisäistä virhelähdettä:

1. SIFT-algoritmi, tunnistaa yhtenevät kuvat hyvällä tarkkuudella, mutta sen kohteiden paikan tunnistamisen tarkkuus voi vaihdella.
2. Kameran kalibrointitietojen luomiseen käytetty algoritmi ei ole yhtä hienostunut, kuin perinteisessä fotogrammetriassa käytetyt algoritmit. Tämä johtuu skaalautuvuushakuisuudesta; sen tulisi toimia minkä tahansa kameras kanssa. Tämän aiheuttamat ongelmat ilmenevät etenkin kuvien reunoilla.
3. Koska metodi on alun perin kehitetty mallintamaan usealla eri kameralla otettujen kuvien pohjalta (esim. Snavely ym. 2008), laskee metodi kameras parametrit jokaiselle kuvalle erikseen. Tutkimuskäytössä kuvaus suoritetaan useimmiten yhdellä kameralla, jolloin oletus useasta kamerasta yhdistettynä kohdan yksi aiheuttamaan virheeseen saattaa aiheuttaa entistä enemmän häiriötä. Tämä ongelma on vain jossain ohjelmistoissa, esimerkiksi Agisoft Metashape mahdollistaa yhden kameras huomioon.

Eltnerin ja kumppaneiden (2016) mukaan virhettä SfM -fotogrammetriassa aiheuttavat erityisesti mittakaava ja sensorin ja kuvauskohteen etäisyys, kameran kalibrointi, ohjelmiston suorituskyky, kuvaverkon rakenne, pinnan tekstuuri ja valaistusolosuhteet sekä GCP:n ominaisuudet.

Jamesin ja Robsonin (2017) mukaan georeferoinnin onnistuminen on tärkeää mallin tarkkuuden kannalta. Vaikka malli muuten olisi tarkka, voi epäonnistunut georeferointi lisätä siihen uusia epävarmuustekijöitä. Kuvassa 3 kuvataan tätä ilmiötä. Kohdassa a viiva kuvaa maanpintaa. Mustien sidospisteiden sijaintia pyritään selvittämään mallituksen avulla. Vaalean harmaat soikiot ovat epävarmuusellipsoideja, jotka kuvaavat liioitellusti niiden sijaintiin liittyvää fotogrammetrista epävarmuutta, joka johtuu esimerkiksi kuvausverkoston geometriasta ja kuvasta suoritettujen mittausten tarkkuudesta. Kohdassa b malli on georeferoitu hyvin, ja georeferoinnista johtuvaa virhettä kuvaavat mustat soikiot. Malli on siis tarkka, ja suurin osa epävarmuudesta on fotogrammetrista. Kohdassa c georeferointi puolestaan on ollut heikkoa, jolloin koko mallin epävarmuus kasvaa, mukaan luettuna fotogrammetrinen epävarmuus.



Kuva 3. Piirros, joka kuvaa fotogrammetrista epävarmuutta, georeferoinnin epävarmuutta sekä niiden yhteyttä. Mukailtu James & Robson (2017: 1771) mukaan.

Korkeusmallin laadun arvioinnin mittareista yleisimpiä ovat keskineliövirhe eli keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE) ja korkeussijainnin harha. Molemmat mittarit arvioivat laatua verrattuna ennalta tunnettuun korkeusarvoon. Keskineliövirhe on todellisen arvon ja mallin arvon erotusten eli residuaalien keskihajonta, toisin sanottuna se siis kuvaa, kuinka lähelle mallin arvioimat arvot osuvat todellisia, mitattuja arvoja. Keskineliövirheen kaava on

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{mi} - Z_{ti})^2},$$

jossa Z_{mi} on pisteen korkeus mallissa ja Z_{ti} on etukäteen tunnettu arvo. Korkeussijainnin harha puolestaan kuvaa korkeussijaintitiedon systemaattista virhettä verrattuna edeltä tunnettuun arvoon. Sen kaava on

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_{mi} - Z_{ti})}{N},$$

jossa Z_{mi} on pisteen korkeus mallissa ja Z_{ti} on etukäteen tunnettu arvo. Nämä mittarit ovat kansainvälisen ISO/DIS 19157:2012 laatustandardin mukaisia. (Kansallisen ... 2016: 7).

RMSE on laajalti käytetty mittari, mutta sen käyttöön liittyy myös ongelmia ja kritiikkiä. James kumppaneineen (2019: 2083) suosittelee, ettei RMS-virhettä käytettäisi ainoana korkeusmallin tarkkuuden mittarina, koska se yhdistää satunnaisvirheen ja systemaattisen virheen yhteen ja samaan estimaattoriin. Ongelmia aiheuttaa myös se, että koska kyseessä on keskihajonta, sen ymmärtäminen ja tulkinta voi olla vaikeaa, verrattuna esimerkiksi virheiden keskiarvoon (esim. Chai & Draxler 2014).

Koska luonnonmaantieteessä tutkittavat alueet ovat usein pinnanmuodoiltaan epätasaisia ja monimutkaisia, liittyy sopivan vertailuaineiston valintaan ongelmia. Vertailukohtana voidaan käyttää joko pistetietoa, kuten GPS - tai takymetrimittausta, tai aluetietoa, kuten laserkeilausmalleja. Pistetiedot ovat tarkkoja, mutta niiden alueellinen sovellettavuus ja paikallisten virheiden tunnistaminen on heikkoa. Aluetieto taas ottaa paikalliset vaihtelut huomioon, mutta sen kokonaistarkkuus voi olla huonompi (Eltner ym. 2016). Kun siis arvioidaan korkeusmallin tarkkuutta, täytyy ottaa huomioon myös se mahdollisuus, että epätarkkuus ja virhe voivat osaltaan johtua myös vertailuaineistosta, eivät pelkästään SfM -mallista. Esimerkiksi maanmittauslaitoksen tuottama korkeusmalli KM2 on jaettu kahteen laatuluokkaan, jotka ilmoitetaan aineiston metatiedoista ja riippuvat muun muassa kuvausoloista. Laatuluokassa yksi RMSE on pienempi kuin 0,3

metriä ja korkeussijainnin harha välillä -0,1 - 0,2 metriä. Laatuluokalle kaksi vastaavat luvut ovat 0,4 ja -0,1 - 0,4 metriä (Kansallisen ... 2016). Mikäli SfM -pintamallia verrattaisiin KM2 -malliin, tulisi vertailuaineiston sisältämä virhe muistaa ottaa huomioon tarkkuutta arvioitaessa.

Mancini kumppaneineen (2013) selvitti metodin tarkkuutta verrattuna sekä TLS-laserkeilausaineistoon, sekä satelliittipaikannusjärjestelmällä mitattuihin pisteisiin. Tutkimuskohteena toimi rantadyyni. Laserkeilausaineistoon verrattuna keskimääräinen ero korkeustiedossa oli 5 cm RMSE:n ollessa 19 cm. Kun vertailussa otettiin huomioon myös paikannetut pisteet, saatiin keskimääräiseksi eroksi 1,5 cm, neliökeskivirheen ollessa 22 cm. Suurimmat erot ilmenivät alueilla, joissa pinnankorkeuden muutokset olivat äkillisiä. Vertailu satelliittipaikannusaineistoon osoitti, että virhe johtui todennäköisesti laserkeilausaineistosta SfM-aineiston sijaan.

Cook (2017) tutki metodin tarkkuutta rotkoympäristössä. Vertailussa laserkeilausaineistoon hän saavutti parhaimmillaan erotusten keskiarvon 13.6 cm ja RMSE:n 33.8 cm. Jälleen suurimmat erot keskittyivät tiheään kasvillisuuden alueelle, sekä lähellä tutkimusalueen reunoja. Tieteellisen metodin validoimisen kannalta on tärkeää tulosten toistettavuus. Cook myös vertaili eri aikaan suoritettujen mittausten tuloksia. Puolet pisteistä olivat 5 senttimetrin sisällä toisistaan, ja 90 % 20 sentin etäisyydellä. Viimeisenä Cook yhdisti nämä kaksi vertailua yhdeksi tutkiessaan SfM:n ja laserkeilauksen eroja geomorfologisen muutoksen seurannassa. Hänen tulostensa mukaan muutosten seuranta on mahdollista, kun muutokset ovat mittaluokaltaan yli 30 cm. Virheitä aiheutti esimerkiksi rotkon keskellä virtaava joki, koska SfM on ongelmissa veden aiheuttamien heijastusten kanssa.

Turner, Lucieer ja Watson (2012) tutkivat mahdollisuutta georeferointiin ilman GCP:ta. He vertasivat kahta samalta alueelta SfM-metodilla tehtyä mallia, joista toinen georeferoitiin perinteiseen tapaan tarkastuspisteiden avulla, ja toinen georeferoitiin ”suoraan” kuvausalueen kiinnitetyn GPS:n avulla. Tutkimusalueena toimi Antarktiksella sijaitseva sammalmuodostuma. Perinteinen georeferointi tuotti 10-15 senttimetrin tarkkuuden, kun taas ”suoralla” menetelmällä päästiin 65-120 senttimetrin tarkkuuteen.

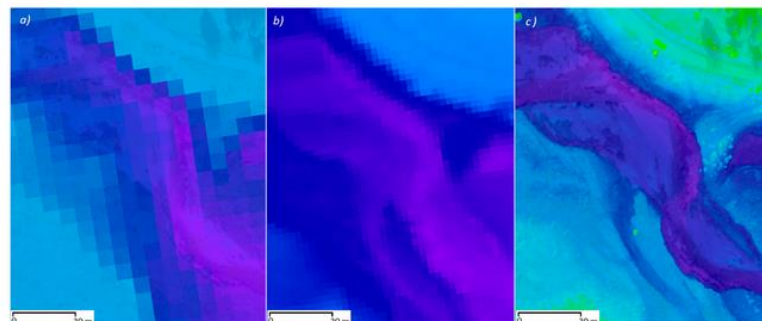
Myös UAV-SfM -yhdistelmän ulkopuolella on tehty tutkimusta. Mikita kumppaneineen (2020) tutki kivenlohkareiden 3D-mallinnusta. Laserkeilausaineistoon

verrattiin matkapuhelimella kuvattua mutta tietokoneella prosessoitua, ja kahta matkapuhelimella sekä kuvattua että prosessoitua mallia. Tulokset vaihtelivat eri lohcareiden välillä, mikä todennäköisesti johtui vaihtelevista valaistusolosuhteista.

Carrera-Hernandez, kumppaneineen (2020) vertasivat SfM-korkeusmallia takymetrillä suoritettuihin mittauksiin. Takymetriamittaus kulutti aikaa viikon, kun taas SfM-aineisto kerättiin dronella neljässä tunnissa. SfM-metodi osoittautui kattavammaksi, nopeammaksi ja tarkemmaksi, ja sillä saavutettiin korkeudessa kahdentoista ja sijainnissa 13 senttimetrin keskineliövirhe.

Mallin tarkkuutta voi tarkastella myös laskemalla niin kutsuttu DoD eli kahden korkeusmallin erotus. Westoby kumppaneineen (2012) vertaili UAV-SfM -korkeusmallin tarkkuutta TLS-laserkeilauksella tuotettuun malliin vähentämällä SfM -mallin arvot TLS-mallista. Tutkimuskohteena toimi rannikkojyrkänne, jossa 94 % arvoista erotukseltaan ± 1 , ja 86 % ± 0.5 metriä. Suurimmat positiiviset erot ilmenivät alueilla, jotka sijaitsivat kaukaisimpina kamerasta, kun taas negatiiviset erot ilmenivät tiheän kasvillisuuden alueilla.

Langhammer kumppaneineen (2017) sisällyttivät artikkeliinsa visuaalisen esityksen (kuva 4) siitä, kuinka vapaasti saatavilla oleva korkeusmalli, vaikka kuinka tarkkaa, voi olla resoluutioltaan riittämätöntä geomorfologisessa tutkimuksessa. Ensimmäisessä kuvassa on Tshekin maanmittausviranomaisen tuottama korkeusmalli DMR4G, jonka resoluutio on 5 x 5 metriä. Keskimmäinen kuva esittää tuoreempaa, tarkempaa mallia DMR5G, ja kolmannessa kuvassa on UAV-SfM-metodilla tuotettu korkeusmalli, jonka tarkkuus on 2 senttimetrin luokkaa.



Kuva 4. Vertailu kahden julkisen korkeusmallin ja SfM-UAV-mallin välillä (Langhammer ym 2017: 18).

Johtopäätökset ja pohdinta

Tämän kandidaatin tutkielman tarkoituksena oli perehtyä Structure from Motion -fotogrammetriaan, ja selvittää vastaus erityisesti kahteen kysymykseen: kuinka tarkkoja metodilla tuotetut pintamallit ovat verrattuina muihin käytössä oleviin pintamalleihin, sekä mitä metodilla on luonnonmaantieteessä tutkittu, ja kuinka sitä voidaan jatkossa tutkimuksessa hyödyntää. Seuraavaksi tarkastelen, mitä näihin kysymyksiin voidaan vastata kirjallisuuden perusteella.

Ensimmäiseen kysymykseen voidaan vastata, että metodi on tutkimuskäytössä suhteellisen tarkkaa, ja tarkkuus on riittävä, kunhan otetaan huomioon useat tarkkuuteen vaikuttavat tekijät, kuten kuvausetaisyys, riittävä määrä GCP:tä sekä niiden oikea sijoittelu, pinnan tasaisuus tai epätasaisuus ja valaistusolosuhteet, ja mahdollisuudet pinnanmuotojen tasoittumiseen tai kupoliefektin syntymiseen näiden tekijöiden myötä. Kuvauskampanjan suunnitteluun on siis keskityttävä hyvin, jotta suurin osa näistä tekijöistä saadaan eliminoidua, tai niiden vaikutuksia kontrolloitua.

Myös inhimillinen tekijä on otettava huomioon tarkkuutta arvioitaessa. Fotogrammetria ja konenäkö tutkimus, joissa SfM -metodin on saanut alkunsa, ovat molemmat hyvin erikoistuneita insinööritieteitä. Nyt kuitenkin teknologinen kehitys on demokratisoinut näitä aloja, ja tuonut aiemmin kalliit ja monimutkaiset metodit ilmaisessa tai edullisessa muodossa lähes kenen tahansa saataville. Tässä kuitenkin piilee sudenkuoppa, sillä näillä uusilla käyttäjillä, esimerkiksi geomorfologeilla, usein ei ole laajaa kokemusta fotogrammetriasta, eikä täyttä ymmärrystä siihen liittyvistä ilmiöistä ja prosesseista (James ym. 2019). Virheitä voi siis syntyä prosessin eri osissa, joissa ne oikealla osaamisella mahdollisesti olisivat vältettävissä.

Toiseen kysymykseen vastaus on, että SfM -metodia on hyödynnetty jo useissa eri tutkimuskohteissa luonnonmaantieteellisessä kontekstissa. Suuri osa tähän mennessä tehdystä tutkimuksesta on kuitenkin pyrkinyt validoimaan metodia verrattuna toisiin metodeihin kuten laserkeilaukseen pohjaten ja varsinaista, itsenäistä tutkimusta on vielä tehty melko vähän. Kun metodin validoimista jatketaan ja se alkaa kypsyä, uskoakseni saavutetaan tilanne, jossa SfM voi olla monelle tutkijalle jokapäiväinen työkalu. Se kuitenkin tuskin tulee syrjäyttämään mitään nykyisistä yleisesti käytettävistä

metodeista, vaan toimimaan uutena lisänä niiden rinnalla, sillä perinteisillä metodeilla on usein vakiintuneet käyttäjäkunnat sekä käyttökohteet.

Dronen käyttö kuvausalueena rajoittaa kuvausalueen kokoa, esimerkiksi akunkeston vuoksi (DeBell ym. 2016: 12). Toisaalta drone mahdollistaa nopean vasteajan esimerkiksi luonnonkatastrofin ja tiedonkeruun välillä, mikä voi olla hyödyllistä esimerkiksi tulvan aiheuttaman eroosion tutkimisessa, kuten Langhammer ja Vacková (2018) osoittivat. Drone myös mahdollistaa kuvaamisen vaikeakulkuisilla alueilla, kuten vuoristossa tai muilla jyrkillä rinteillä (esim. Cook 2017). Drone-SfM yhdistelmä myös tarjoaa kustannustehokkuutta verrattuna perinteisiin kaukokartoitusmetodeihin, esimerkiksi sensorien ja alustojen edullisuuden vuoksi (Mířijovský & Langhammer 2015, Smith ym. 2016: 249). Jos tutkimusalue kasvaa suureksi, kasvavat myös kuvaukseen ja prosessointiin käytettävä aika, jolloin myös kustannustehokkuus voi laskea.

Structure from Motion on perinteisesti ollut vaikeuksissa erityisesti kahdessa eri tapauksessa: laajojen tasaisten pintojen, kuten jäätiköiden, ja vedenalaisten pinnanmuotojen selvittämisessä. Jäätiköillä ja muilla tasaisilla pinnoilla ongelmat johtuvat metodin perustumisesta erottuvien kohteiden tunnistamiseen, ja yhtenäisellä lumi- tai jääpeitteellä voi tapahtua väärien pisteiden yhdistämistä. Veden syvyyden mittaamiseen eli batymetriaan SfM ei ole soveltunut, koska veden pinta voi olla läpäisemätöntä esimerkiksi voimakkaiden pyörteiden ja aaltoilun vuoksi. Vesi myös heijastaa valonsäteitä ja vääristää niitä, ja siksi esimerkiksi valuma-alueiden mallinnuksissa on tarvittu lisäksi toisia metodeja vedenalaisten pinnanmuotojen selvittämiseksi (Javernick ym. 2014, Langhammer ym. 2017). Nämäkin rajoitteet metodin kohdalla alkavat hiljalleen olla historiaa. Esimerkiksi Terwissa van Schehtinga (2020) kumppaneineen on kehittänyt veden pinnan lävitse mallintavaa metodologiaa, joka voi mahdollistaa esimerkiksi virtaaman aiheuttaman eroosio-, kuljetus- ja kasautumisprosessien tutkimista SfM- fotogrammetrialla.

Structure from Motionin paikka kaukokartoituskentällä tulee siis olemaan edullinen, joustava, pienekköjen tutkimusalueiden metodi, jolla on käyttöä etenkin ajallisesti riippuvaisen sekä resoluutioltaan pienipiirteisen tiedon tutkimuksessa. Kuten tutkimuksissa usein vertailumetodina toimiminen osoittaa, SfM haastaa etenkin drone- ja TLS-laserskannausta. Ilmasta tehtävä laserkeilaus on ollut vahvasti edustettuna metsäntutkimuksessa, koska sillä voidaan selvittää sekä latvuston että maanpinnan

korkeus. Esimerkiksi Wallace kumppaneineen (2016) tutkivat SfM:n soveltuvuutta tähän, mutta lupaavista tuloksista huolimatta ALS osoittautui yhä tarkemmaksi metodiksi tässä kontekstissa. Monella muulla tutkimusalalla metodi on kuitenkin tuottanut tarkkuudeltaan laserkeilaukseen verrattavia aineistoja.

Tulevaisuudessa metodia voidaan hyödyntää esimerkiksi eroosion tutkimuksessa useissa eri ympäristöissä esimerkiksi laskemalla kahden samasta alueesta tuotetun korkeusmallin erotus, kuten Cook kumppaneineen (2017). Kunhan mallin tarkkuus saadaan riittävälle tasolle, voi olla mahdollista jopa laskea erodoituneen aineksen määriä mallien pohjalta. Dronekuvauksen ulkopuolella yksi mahdollisuus voisi olla myös tutkia esimerkiksi internetistä löytyvien kuvien perusteella ihmisten aiheuttamia muutoksia suosituissa, usein kuvatuissa luontokohteissa, kuten vaikkapa Ukko-Kolin huipulla. Jo nyt matkapuhelimiin on saatavilla sovelluskaupoista niin ilmaisia kuin maksullisia SfM-sovelluksia, joiden tarkkuutta tutkivat esimerkiksi Mikita kumppaneineen (2020). Vaikka he eivät onnistuneet saamaan selvää tulosta näiden sovellusten tarkkuudesta, voivat ne tarjota tulevaisuudessa entistä suurempia mahdollisuuksia myös tutkimuskäytössä.

Structure from Motion on siis edellisen vuosikymmenen kuluessa kasvanut mahdollisesta kaukokartoituksen mullistajasta yhdeksi metodiksi muiden rinnalle. Metodin käyttöön liittyy joitakin epävarmuustekijöitä, jotka tässä tutkielmassa on jo tuotu esille, ja mahdollisia virheen aiheuttajia prosessin aikana on useita. Kunhan nämä tekijät huomioidaan niin tutkimuksen suunnittelun ja toteutuksen aikana, on metodilla mahdollista tuottaa tarkkoja ja luotettavia pintamalleja luonnonmaantieteen tutkijoiden käyttöön. Näiden tekijöiden takaamiseksi useat tutkijat ovat pyrkineet luomaan validoinnin yhteydessä seurattavia työnkulkuja eri sovellutusaloille onnistuneen mallintamisen takaamiseksi. Tätä toimintaa kannattaa jatkaa metodin luotettavuuden takaamiseksi myös tulevaisuudessa.

Lähteet

- Agisoft (2020). *Agisoft metashape user manual, professional edition, version 1.6*. Agisoft LLC.
- Baltsavias, E.P (1999). A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 54: 2. 83-94.
- Carrera-Hernández, J.J., G. Levresse & P. Lacan (2020) Is UAV-SfM Surveying Ready to Replace Traditional Surveying Techniques? *International Journal of Remote Sensing*. 41: 12. 4818-4835.
- Chai, T. & R. R. Draxler (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development* 7: 3. 1247-1250.
- Colomina, I. & P. Molina (2014). Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 92. 79-97.
- Cook, K. L. (2017). An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology* 278, 195-208.
- DeBell, L., Anderson K, Brazier RE, King N & Jones L (2016). Water resource management at catchment scales using lightweight UAVs: current capabilities and future perspectives. *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 4: 1. 7-30.
- Droneinfo (2020). Liikenne- ja viestintävirasto Traficom.
https://www.droneinfo.fi/fi/nain_lennatat_turvallisesti. 29.04.2020.
- Eltner, A., A. Kaiser, C. Castillo, G. Rock, F. Neugirg & A. Abellán (2016). Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics* 4: 2. 359-389.
- EU 2019/947 (2019). Commission implementing regulation (EU) 2019/947 of May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft. *Official Journal of the European Union* 152. 45-71.
- Geoinformatiikan sanasto (2018). Maanmittauslaitos. Sanastokeskus, Helsinki.
- James, M. R. & S. Robson (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117. 1-17.

- James, M. R., S. Robson & M. W. Smith (2017). 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms* 42: 12. 1769-1788.
- James, M. R., J. H. Chandler, A. Eltner, C. Fraser, P.E Miller, & J. P. Mills. (2019). Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. *Earth Surface Processes and Landforms* 44: 10. 2081-2084.
- Javernick, L., J. Brasington & B. Caruso (2014). Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 213. 166-182.
- Kansallisen maastotietokannan laatukäsikirja (2016). Korkeusmallit. Maanmittauslaitos 2016.
- Korpela, I., A. Hovi & L. Korhonen (2013). Backscattering of Individual LiDAR Pulses from Forest Canopies Explained by Photogrammetrically Derived Vegetation Structure. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 83. 81-93.
- Koslovskiy, V.V. (2010). *Progress in laser and electro-optics research* 242 s. Nova Science Publishers, New York.
- Langhammer, J. & T. Vacková (2018). Detection and Mapping of the Geomorphic Effects of Flooding Using UAV Photogrammetry. *Pure and Applied Geophysics* 175:9. 3223-3245.
- Langhammer, J., J. Bernsteinová & J. Miřijovský (2017). Building a High-Precision 2D Hydrodynamic Flood Model Using UAV Photogrammetry and Sensor Network Monitoring. *Water* 9: 11. 861-883.
- Lillesand, T.M. & R. W. Kiefer (2000). *Remote sensing and image interpretation*. 724 s. John Wiley & Sons, New York.
- Lucieer, A., S.M. Jong & D. Turner (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography* 38: 1. 97-116.
- Mallet, C. & F. Bretar (2009). Full-Waveform Topographic Lidar: State-of-the-Art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 64: 1. 1-16.
- Mancini, F., M. Dubbini, M. Gattelli, F. Stecchi, S. Fabbri & G. Gabbianelli (2013). Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of

- topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing* 5: 12. 6880-6898.
- McClelland, M.P., J. Van Aardt & D. Hale (2020). Manned aircraft versus small unmanned aerial system-forestry remote sensing comparison utilizing lidar and structure-from-motion for forest carbon modeling and disturbance detection. *Journal of Applied Remote Sensing* 14: 2. 1-21.
- Micheletti, N., J.H Chandler & S.N. Lane (2015). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms* 40: 4. 473-486.
- Mikita, T., M. Balková, A. Bajer, M. Cibulka & Z. Patočka (2020). Comparison of different remote sensing methods for 3D modeling of small rock outcrops. *Sensors (Switzerland)* 20: 6. 1-17.
- Miřijovský, J. & J. Langhammer (2015). Multitemporal Monitoring of the Morphodynamics of a Mid-Mountain Stream Using UAS Photogrammetry. *Remote Sensing* 7: 7. 8586-8609.
- Oniga, V., A. Breaban, N. Pfeifer & C. Chirila (2020). Determining the suitable number of ground control points for UAS images georeferencing by varying number and spatial distribution. *Remote Sensing* 12: 5.
- Peña-Villasenín, S, M. Gil-Docampo & J. Ortiz-Sanz (2020). Desktop Vs Cloud Computing Software for 3D Measurement of Building Façades: The Monastery of San Martín Pinario. *Measurement*. 149. 1069-1084.
- Qiaoliang, L., W. Guoyou, L. Jianguo & C. Shaobo (2009). Robust Scale-Invariant Feature Matching for Remote Sensing Image Registration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 6: 2. 287-291.
- Rupnik, E, M. Pierrot-Deseilligny & A. Delorme (2018). 3D Reconstruction from Multi-View VHR-Satellite Images in MicMac. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 139. 201-211.
- Schönberger, J.L. & J. Frahm (2016). Structure-from-Motion Revisited. 2016 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 4104-4113.

- Smith, M.W., J.L. Carrivick & D.J. Quincey (2016). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography* 40: 2. 247-275.
- Snavely, N., S. M. Seitz & R. Szeliski (2008). Modeling the world from Internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80: 2. 189-210.
- van Scheltinga, T., C. Renske, G. Coco, M.G. Kleinhans & H. Friedrich (2020). Observations of Dune Interactions from DEMs using through-Water Structure from Motion. *Geomorphology*. 359. 107-126.
- Turner D., A. Lucieer & C. Watson (2012). An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Remote Sensing*. 4: 5. 1392-1410.
- Wallace L., A. Lucieer, Z. Malenovský, D. Turner & P. Vopěnka (2016). Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests* 7: 12. 62-74.
- Wehr, A. & U. Lohr (1999) Airborne Laser Scanning—an Introduction and Overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 54: 2. 68-82.
- Westoby, M. J., J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey & J. M. Reynolds (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300-314.
- Yanagi, H. & H. Chikatsu (2016). Performance Evaluation of 3D Modeling Software for UAV Photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 41. 147-152.
- Zhang, J. & M.F. Goodchild (2002). *Uncertainty in geographical information*. 266 s. Taylor & Francis, London.